



7 / Priority  
Doc.  
E. Willis  
5-21-02

10978 U.S.  
09/91887  
07/31/01

## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 100 57 025.9

**Anmeldetag:** 17. November 2000

**Anmelder/Inhaber:** Siemens AG, München/DE

**Bezeichnung:** Phasensparende Tiefpassfilter zur Antriebsregelung  
bei hoher Regeldynamik

**IPC:** G 05 D, H 02 P, G 05 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 27. Juni 2001  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Wallner

## Beschreibung

### Phasensparende Tiefpassfilter zur Antriebsregelung bei hoher Regeldynamik

5

Die Erfindung bezieht sich auf eine Antriebsregelung für einen elektrischen Antrieb mit hoher Regeldynamik in Form einer vermaschten Regelstruktur mit einer Drehzahlregelschleife und mit einer innerhalb dieser angeordneten Stromregelschleife, wobei die Drehzahlregelung einen Regler mit Proportionalanteil und Integralanteil sowie ein nachgeschaltetes Filter zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke umfasst.

Bei der Regelung von Werkzeugmaschinen, Robotern oder anderen Produktionsmaschinen bereiten die in der Regelstrecke parasitären Resonanzen Probleme. Herkömmlicherweise werden diese durch den Einsatz von Filtern unschädlich gemacht.

Jedoch bringt auch eine Kompensation mit Filtern Probleme mit sich. Durch den Phasenverbrauch der eingesetzten Filter werden die erreichbaren Reglerverstärkungen reduziert, was einen Dynamikverlust für das geregelte System bedeutet. Dies ist gerade bei den heutigen hochdynamischen elektrischen Antrieben unerwünscht, weil so ein Teil der konstruktionsbedingt durch die Antriebe verfügbaren Dynamik wieder verloren geht.

Filter werden in der Regel in einer Drehzahlregelung eingesetzt. Die Darstellung nach FIG 1 zeigt hierzu ein Blockschaltbild einer prinzipiellen regelungstechnischen Struktur zur Steuerung eines elektrischen Antriebes. Gezeigt ist eine Antriebsregelung A mit einem Lageregler L, einem darauffolgenden Drehzahlregler D sowie einem darauffolgenden Stromregler S mit entsprechenden Sollwerten  $l^*$  für die Lage,  $n^*$  für die Drehzahl und  $i^*$  für den Strom. Damit wird ein Motor M über ein Leistungsteil LT, einem Wechselrichter mit Gleichrichter, Spannungszwischenkreis und einem Wandler mit Leistungstransistoren, geregelt. Dem Drehzahlregler D ist zu Po-

sitionierzwecken der Lageregler L übergeordnet, z.B. für einen Vorschubantrieb oder eine C-Achse eines Hauptspindelmotors.

- 5 Vom Leistungsteil LT werden entsprechende Stromistwerte  $i_a$  und  $i_b$  zum Stromregler zurückgeführt. Die dritte Phase des Drehstrommotors M wird berechnet. An die Achse des Motors M ist ein Gebersystem mit einem Tachometer G und einem Lagegeber LG angebracht, die einen Drehzahlwert  $n$  an den Dreh-
- 10 zahlregler D und einen Lageistwert  $l$  an den Lageregler L zurückliefern.

Die Darstellung nach FIG 2 zeigt einen Ausschnitt aus diesem Blockschaltbild nach FIG 1 als Regelkreisstruktur. Gezeigt

15 sind der Drehzahlregler D, dem eine Vorverarbeitungseinheit V vorgeschaltet ist, die mit den Drehzahlsollwerten  $n^*$  beaufschlagt wird, und der Stromregler S, welcher vom Drehzahlregler Stromsollwerte  $i^*$  erhält und Stromistwerte  $i$  liefert. Diese werden über ein KT-Glied zur Erzeugung von Momentwerten

20  $m$  an den Motor M geführt, der Drehzahlwerte  $n$  generiert, die negativ auf den Eingang des Drehzahlreglers D rückgekoppelt werden. Gleiches gilt für die Stromistwerte  $i$ , die ebenfalls auf den Eingang des Stromreglers S zurückgeführt werden.

- 5 Besondere Aufmerksamkeit kommt dabei dem Aufbau des Drehzahlreglers D bei, der in FIG 3 gezeigt ist. Dieser umfasst in der Regel einen PI-Regler mit Proportional- und Integralanteil, dem das bereits angesprochene Filter F nachgeschaltet
- 30 ist.

Bisher wurden entweder einzelne Resonanzen innerhalb eines solchen Regelkreises gezielt durch Filter F in Form von Bandsperrern bedämpft oder es wurde mittels eines in der Regelungstechnik üblichen Tiefpassfilters (PT1 oder PT2-Glied)

35 eine Filterwirkung über einen großen Frequenzbereich eingestellt.

FIG 4 zeigt den Amplituden-  $A(f)$  und den Phasenverlauf  $\varphi(f)$  einer Bandsperre über die Frequenz  $f$  aufgetragen.

PT1- und PT2-Glieder bewirken eine mit steigender Frequenz  $f$  zunehmende Amplitudenabsenkung, die auch bei hohen Frequenzen wirksam ist, wo wegen des Tiefpassverhaltens der Mechanik eines elektrischen Antriebes eine Absenkung nicht notwendig wäre. Diese unnötige Absenkung hat zusätzliche Phaseneinbußen bei niedrigen Frequenzen zur Folge. Dieser Zusammenhang ist auch aus dem in FIG 5 gezeigten Amplituden-  $A(f)$  und den Phasenverlauf  $\varphi(f)$  eines PT2-Glieds ersichtlich.

Eine Bedämpfung einzelner Resonanzen mittels Bandsperren bedeutet demnach zwar einen relativ geringen Phasenverlust und damit auch nicht allzu große Einbußen an Dynamik. Allerdings ist die Robustheit einer derartigen Parametrierung gering. Denn verschieben sich die Resonanzen, was beispielsweise durch Alterungsprozesse, durch Verwendung anderer Werkzeuge/Werkstücke, veränderte Maschinengeometrie oder im Bearbeitungszustand (Werkzeugeingriff) auftreten kann, so wird das geregelte System instabil oder schlecht gedämpft.

Bei den in der Automatisierungstechnik verstärkt eingesetzten Direktantrieben variieren oftmals Resonanzfrequenzen während des Verfahrensvorgangs besonders stark und können daher nicht durch Bandsperren unwirksam gemacht werden. Bandsperren bringen daher eine mangelnde Robustheit mit sich, da nur ein enger Frequenzbereich gefiltert wird. Bei Linearantrieben ist die Regelstrecke zumeist durch viele recht dicht beieinander liegende Resonanzfrequenzen gekennzeichnet, die in der Praxis nur mit Tiefpassfiltern wirksam unterdrückt werden können.

Herkömmliche Tiefpassfilter sorgen zwar für eine robuste Einstellung, die auch bei sich ändernden Resonanzen ein stabiles Verhalten gewährleistet, bedeuten aber eine erhebliche Dynamikeinbuße, die gerade bei Direktantrieben nicht toleriert werden kann. Bereits geringe Phasenabsenkungen verlangsamen

das geregelte System merklich. Eine große Phaseneinbuße von 30 Grad verwandelt einen dynamischen, schnellen Antrieb in ein langsames System. Aufgrund des starken Phasenabfalls muss man somit eine geringe Reglerverstärkung und dadurch bedingt  
5 eine schlechtere Störunterdrückung und ein langsames Führungsverhalten in Kauf nehmen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, diesen Verlust an Dynamik zu minimieren und ein Optimum aus Robustheit  
10 und Dynamik zu erreichen.

Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe durch eine Antriebsregelung für einen elektrischen Antrieb mit hoher Regeldynamik in Form einer vermaschten Regelstruktur gelöst, die mit einer  
15 Drehzahlregelschleife und mit einer innerhalb dieser angeordneten Stromregelschleife ausgestattet ist. Die Drehzahlregelung umfasst dabei einen Regler mit Proportionalanteil und Integralanteil sowie ein nachgeschaltetes Filter zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke, wobei ein hin-  
20 sichtlich Frequenzbereich und Amplitudenabsenkung auf die zu unterdrückenden Resonanzen abgestimmtes phasensparendes Tiefpassfilter vorgesehen ist.

Mit phasensparenden Tiefpassfiltern wird somit im Vergleich zum bekannten Stand der Technik ein Verlust an Dynamik deutlich minimiert und ein Optimum aus Robustheit und Dynamik erreicht.

Eine vorteilhafte Realisierung eines solchen phasensparenden  
30 Filters wird durch den Einsatz eines PDT2-Glieds als Tiefpassfilter erreicht.

Besonders einfach und kostengünstig lässt sich ein solches Filter realisieren, wenn die Drehzahlregelung als digitaler  
35 Regler mit einem Rechenmittel ausgestaltet ist, der das PDT2-Glied anhand der folgenden Differenzengleichung 2. Ordnung ermittelt:

$$u_k = V_F \cdot (e_k + a_1 e_{k-1} + a_0 e_{k-2}) - u_{k-1} b_1 - u_{k-2} b_0$$

mit

- 5  $u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und  
 $e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

Alternativ hat sich der Einsatz eines Cauer-Filters als Tiefpassfilter als besonders günstig erwiesen, insbesondere der  
 10 eines Cauer-Filters 2. Ordnung.

Besonders einfach und kostengünstig lässt sich ein solches Filter realisieren, wenn die Drehzahlregelung als digitaler Regler mit einem Rechenmittel ausgestaltet ist, der das Cauer-Filter anhand der folgenden Differenzengleichung 2. Ordnung ermittelt:

$$u_k = a_0 u_{k-1} + a_1 u_{k-2} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + b_2 e_{k-2}$$

20 mit

- $u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und  
 $e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

Noch bessere Ergebnisse lassen sich, wenngleich mit erhöhtem Rechenaufwand, mit einem Cauer-Filter 8. Ordnung als Tiefpassfilter erzielen. Dabei kann die Drehzahlregelung ebenfalls als digitaler Regler mit einem Rechenmittel ausgestaltet ist, der das Cauer-Filter anhand der folgenden Differenzengleichung 8. Ordnung realisiert:

30

$$u_k = a_0 u_{k-1} + a_1 u_{k-2} + \dots + a_7 u_{k-7} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + \dots + b_8 e_{k-8}$$

mit

- $u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und  
 35  $e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

Durch die Verwendung eines PDT2-Filters oder eines Cauer-Filters zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke einer Regelung, insbesondere in einer Drehzahlregelung für einen elektrischen Antrieb lassen sich somit entscheidende Vorteile gegenüber dem bekannten Stand der Technik mit PT2-Gliedern als Tiefpassfilter erzielen.

Dies eignet sich besonders zum Einsatz in numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen oder Robotern.

10

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich anhand der folgenden Beschreibung der vorteilhaften Filter und in Verbindung mit den Figuren. Es zeigt:

- 15    FIG 1        ein Blockschaltbild einer prinzipiellen regelungs-  
                  technischen Struktur zur Steuerung eines elektri-  
                  schen Antriebes,
- FIG 2        einen Ausschnitt aus diesem Blockschaltbild nach  
                  FIG 1 als Regelkreisstruktur,
- 20    FIG 3        den Aufbau des Drehzahlreglers,
- FIG 4        den Amplituden-  $A(f)$  und den Phasenverlauf  $\varphi(f)$  ei-  
                  ner Bandsperre über die Frequenz  $f$ ,
- FIG 5        den Amplituden-  $A(f)$  und den Phasenverlauf  $\varphi(f)$  ei-  
                  nes PT2-Glieds über die Frequenz  $f$ ,
- FIG 6        den Amplituden-  $A(f)$  und den Phasenverlauf  $\varphi(f)$  ei-  
                  nes PT2-Glieds im Vergleich zu den phasensparenden  
                  Filtern PDT2-Glied und Cauer-Filter 2. Ordnung über  
                  die Frequenz  $f$  und
- FIG 7        eine Gegenüberstellung des Amplituden-  $A(f)$  und des  
30                    Phasenverlaufs  $\varphi(f)$  eines Cauer-Filters 8. Ordnung  
                  im Vergleich zu einem Cauer-Filter 2. Ordnung über  
                  die Frequenz  $f$ .

Die neu entwickelten Filter nach der Erfindung erlauben eine  
35    ideale Anpassung hinsichtlich Frequenzbereich und Amplituden-  
absenkung. In der Darstellung nach FIG 6 werden exemplarisch  
zwei der neuen Filter, nämlich ein PDT2-Glied PDT2 (punk-

tiert) und ein Cauer-Filter 2. Ordnung C2 (durchgezogen), im Vergleich zu einem herkömmlichen Tiefpass mit PT2-Glied PT2 (strichpunktiert) gezeigt. Aufgetragen ist jeweils der Amplitudenverlauf  $A(f)$  und den Phasenverlauf  $\varphi(f)$  über die Frequenz  $f$ . Alle Filter erfüllen die Forderung, ab 800Hz eine Amplitudenabsenkung von 25dB zu gewährleisten.

Während das PT2-Glied eine erhebliche Phasenabsenkung mit sich bringt, verbraucht das gezeigte PDT2-Glied erheblich weniger Phase, erreicht aber trotzdem eine hinreichende Absenkung. Das Cauer-Filter zweiter Ordnung zeigt sogar einen noch günstigeren Phasenverlauf als das PDT2-Glied, da das Cauer-Filter noch weniger Phase verbraucht. Beide, Cauer-Filter 2. Ordnung und PDT2-Glied, sind mit annähernd dem gleichen Rechenaufwand über eine Differenzengleichung 2. Ordnung zu realisieren wie ein PT2-Glied.

Derartige Filter werden bisher in der Regelungstechnik nicht eingesetzt. Die dargestellten Filter ermöglichen erstmals, gezielt und systematisch Robustheit und Dynamik optimal miteinander zu verbinden. Cauer-Filter haben ihren Einsatzbereich in der Nachrichtentechnik, wo der steile Amplitudenabfall von Bedeutung ist und nicht, wie bei einer regelungstechnischen Anwendung, der geringe Phasenverbrauch. In der Nachrichtentechnik ist ein solcher geringer Phasenverbrauch nämlich nicht von Bedeutung.

Vorteilhaft ist bei den beschriebenen Filtern PDT2-Glied und Cauer-Filter neben der geringen Phasenabsenkung die leichte Parametrierbarkeit. Durch Festlegen der gewünschten Amplitudenabsenkung und des gewünschten Frequenzbereichs sind alle Parameter eines Filters bestimmt.

Dabei kann das Cauer-Filter 2. Ordnung z.B. mit einem digitalen Rechenglied wie einem Mikroprozessor, Mikrocontroller oder einem geeigneten ASIC (anwendungsspezifizierter integ-



rierter Schaltkreis) nach folgender Berechnungsvorschrift durch eine Differenzengleichung realisiert werden:

$$u_k = a_0 u_{k-1} + a_1 u_{k-2} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + b_2 e_{k-2} \quad (1)$$

5

mit

$u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und

$e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

- 10 Der Ausgang eines Cauer-Filters 2. Ordnung errechnet sich somit aus den beiden vergangenen Filterausgängen ( $u_{k-1}$ ,  $u_{k-2}$ ), dem aktuellen Filtereingang ( $e_k$ ) und den beiden vergangenen Filtereingängen ( $e_{k-1}$ ,  $e_{k-2}$ ). Die Faktoren  $a$  und  $b$  sind Parameter, die aus den für den Anwendungsfall gewünschten Filtereigenschaften wie Grenzfrequenz und Absenktiefe nach bekannten
- 15 Algorithmen berechnet werden (vgl. dazu auch Kammeyer/Kroschel: Digitale Signalverarbeitung, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1989, S. 91f. oder Schröder, E.: Signalverarbeitung; numerische Verarbeitung digitaler Signale, Hanser-Verlag,
- 20 München, 1990, S. 215 u. S. 220).

- Einen höheren Realisierungsaufwand, aber einen nochmals bedeutend besseren Phasenverlauf zeigt ein Cauer-Filter 8. Ordnung. Dies wird aus einer in FIG 7 gezeigten Gegenüber-
- 25 stellung des Amplituden-  $A(f)$  und des Phasenverlaufs  $\varphi(f)$  über die Frequenz  $f$  eines Cauer-Filters 8. Ordnung C8 (durchgezogen) im Vergleich zu einem Cauer-Filter 2. Ordnung C2 (punktiert) deutlich.

- 30 Ein solches Cauer-Filter 8. Ordnung entsteht durch Überlagerung von 4 Bandsperren mit unterschiedlichen Zähler- und Nennerkennfrequenzen. Mit einem derartigen Filter kann eine im Vergleich zum PT2-Glied um mindestens den Faktor 2 höhere Reglerverstärkung eingestellt werden.

35

Ein Cauer-Filter 8. Ordnung kann mit einem digitalen Rechenmittel z.B. anhand der folgenden Differenzengleichung 8. Ordnung realisiert werden:

$$u_k = a_0 u_{k-1} + a_1 u_{k-2} + \dots + a_7 u_{k-7} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + \dots + b_8 e_{k-8} \quad (2)$$

mit

$u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und

$e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

10

Eine entsprechende Realisierung eines PDT2-Glieds lässt sich dabei wie folgt erreichen. Nimmt man die Filterfunktion  $F(s)$  im kontinuierlichen Bereich wie folgt an

$$F(s) = \frac{1 + s \frac{2d_A}{\omega_A} + \frac{s^2}{\omega_A^2}}{1 + s \frac{2d_B}{\omega_B} + \frac{s^2}{\omega_B^2}} \quad (3)$$

mit

$$s_{A1/2} = \underbrace{-d_A \omega_A}_{\sigma_A} \pm \underbrace{j \omega_A \sqrt{1-d_A^2}}_{\omega_A} \quad (4)$$

20

und

$$s_{B1/2} = \underbrace{-d_B \omega_B}_{\sigma_B} \pm \underbrace{j \omega_B \sqrt{1-d_B^2}}_{\omega_B} \quad (5)$$

25 wobei  $\omega_A$ ,  $\omega_B$  Kreisfrequenzen und  $d_A$ ,  $d_B$  Dämpfungswerte darstellen, so ergibt sich daraus für den zeitdiskreten Bereich

$$F(z) = \underbrace{\frac{(1-z_B)(1-\bar{z}_B)}{(1-z_A)(1-\bar{z}_A)}}_{V_F} \cdot \frac{(z-z_A)(z-\bar{z}_A)}{(z-z_B)(z-\bar{z}_B)} \quad (6)$$

30 mit

$$z_{A,B} = e^{\sigma_{A,B}T} \cdot (\cos \omega_{A,B}T + j \sin \omega_{A,B}T) \quad (7)$$

wobei

- 5  $z = e^{-sT}$  ist mit  $s$  als Laplace-Operator und  
 $\bar{z}$  als dem konjugiert komplexen Wert von  $z$ .

Nach Ausmultiplizieren des Filters ergibt sich damit

$$10 \quad F(z) = \frac{z^2 + z \cdot \overbrace{(-2\operatorname{Re}(z_A))}^{a_1} + \overbrace{|z_A|^2}^{a_0}}{z^2 + z \cdot \underbrace{(-2\operatorname{Re}(z_B))}_{b_1} + \underbrace{|z_B|^2}_{b_0}} \cdot V_F \quad (8)$$

mit

$$a_1 = -2\sigma_A T \cdot \cos \omega_A T \quad (9)$$

$$15 \quad a_0 = e^{2\sigma_A T} \quad (10)$$

$$b_1 = -2\sigma_B T \cdot \cos \omega_B T \quad (11)$$

$$20 \quad b_0 = e^{2\sigma_B T} \quad (12)$$

Daraus lässt sich nun folgendes Verhältnis von der Ausgangsgröße des Filters  $u_k$  zur Eingangsgröße des Filters  $e_k$  ableiten:

$$25 \quad \frac{u_k}{e_k} = F(z) = V_F \cdot \frac{1 + a_1 z^{-1} + a_0 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_0 z^{-2}} \quad (13)$$

Daraus wiederum resultiert die folgende Differenzengleichung zur Realisierung eines PDT2-Gliedes 2. Ordnung mit einem Rechenmittel zu

$$30 \quad u_k = V_F \cdot (e_k + a_1 e_{k-1} + a_0 e_{k-2}) - u_{k-1} b_1 - u_{k-2} b_0 \quad (14)$$

mit

$u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und

$e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

- 5 Eine Amplitudensenkung beginnt dabei etwa bei der Kreisfrequenz  $\omega_A$  und die Höhe der Absenkung wird durch das Verhältnis  $(\omega_A / \omega_B)^2$  bestimmt. Die beiden Dämpfungsparameter  $d_A$ ,  $d_B$  werden vorzugsweise mit einem Wert zwischen 0,6 und 0,7 belegt.

- 10 Die erfindungsgemäßen Filter PDT2-Glied und Cauer-Filter besitzen für Aufgaben der Regelungstechnik somit den Vorteil einer größeren Robustheit, da ein großer Frequenzbereich gefiltert wird, und einen wesentlich geringeren Phasenabfall als herkömmliche Tiefpassfilter.

15

Diese Filter wurden bei verschiedenen regelungstechnischen Applikationen bereits testweise erfolgreich eingesetzt. Beispielsweise konnten bei Schleifmaschinen, deren Regelstrecke sich durch Wechseln von Werkzeugen und Werkstücken ändert,

- 20 nur mit Hilfe von Cauer-Filtern oder einem PDT2-Glied eine robuste und dynamische Einstellung erreicht werden.

Insgesamt wird mit dem erfindungsgemäßen neuen Einsatz dieser phasensparenden Filter eine neue Vorgehensweise bei der Reglerparametrierung von Werkzeug- und Produktionsmaschinen geschaffen.

25

# Patentansprüche

1. Antriebsregelung für einen elektrischen Antrieb mit hoher Regeldynamik in Form einer vermaschten Regelstruktur mit einer Drehzahlregelschleife (D) und mit einer innerhalb dieser (D) angeordneten Stromregelschleife (S), wobei die Drehzahlregelung (D) einen Regler (PI) mit Proportionalanteil und Integralanteil sowie ein nachgeschaltetes Filter (F) zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke umfasst,  
 5  
 10  
 15  
 20  
 25  
 30  
 35  
 40  
 45  
 50  
 55  
 60  
 65  
 70  
 75  
 80  
 85  
 90  
 95  
 100  
 105  
 110  
 115  
 120  
 125  
 130  
 135  
 140  
 145  
 150  
 155  
 160  
 165  
 170  
 175  
 180  
 185  
 190  
 195  
 200  
 205  
 210  
 215  
 220  
 225  
 230  
 235  
 240  
 245  
 250  
 255  
 260  
 265  
 270  
 275  
 280  
 285  
 290  
 295  
 300  
 305  
 310  
 315  
 320  
 325  
 330  
 335  
 340  
 345  
 350  
 355  
 360  
 365  
 370  
 375  
 380  
 385  
 390  
 395  
 400  
 405  
 410  
 415  
 420  
 425  
 430  
 435  
 440  
 445  
 450  
 455  
 460  
 465  
 470  
 475  
 480  
 485  
 490  
 495  
 500  
 505  
 510  
 515  
 520  
 525  
 530  
 535  
 540  
 545  
 550  
 555  
 560  
 565  
 570  
 575  
 580  
 585  
 590  
 595  
 600  
 605  
 610  
 615  
 620  
 625  
 630  
 635  
 640  
 645  
 650  
 655  
 660  
 665  
 670  
 675  
 680  
 685  
 690  
 695  
 700  
 705  
 710  
 715  
 720  
 725  
 730  
 735  
 740  
 745  
 750  
 755  
 760  
 765  
 770  
 775  
 780  
 785  
 790  
 795  
 800  
 805  
 810  
 815  
 820  
 825  
 830  
 835  
 840  
 845  
 850  
 855  
 860  
 865  
 870  
 875  
 880  
 885  
 890  
 895  
 900  
 905  
 910  
 915  
 920  
 925  
 930  
 935  
 940  
 945  
 950  
 955  
 960  
 965  
 970  
 975  
 980  
 985  
 990  
 995  
 1000  
 1005  
 1010  
 1015  
 1020  
 1025  
 1030  
 1035  
 1040  
 1045  
 1050  
 1055  
 1060  
 1065  
 1070  
 1075  
 1080  
 1085  
 1090  
 1095  
 1100  
 1105  
 1110  
 1115  
 1120  
 1125  
 1130  
 1135  
 1140  
 1145  
 1150  
 1155  
 1160  
 1165  
 1170  
 1175  
 1180  
 1185  
 1190  
 1195  
 1200  
 1205  
 1210  
 1215  
 1220  
 1225  
 1230  
 1235  
 1240  
 1245  
 1250  
 1255  
 1260  
 1265  
 1270  
 1275  
 1280  
 1285  
 1290  
 1295  
 1300  
 1305  
 1310  
 1315  
 1320  
 1325  
 1330  
 1335  
 1340  
 1345  
 1350  
 1355  
 1360  
 1365  
 1370  
 1375  
 1380  
 1385  
 1390  
 1395  
 1400  
 1405  
 1410  
 1415  
 1420  
 1425  
 1430  
 1435  
 1440  
 1445  
 1450  
 1455  
 1460  
 1465  
 1470  
 1475  
 1480  
 1485  
 1490  
 1495  
 1500  
 1505  
 1510  
 1515  
 1520  
 1525  
 1530  
 1535  
 1540  
 1545  
 1550  
 1555  
 1560  
 1565  
 1570  
 1575  
 1580  
 1585  
 1590  
 1595  
 1600  
 1605  
 1610  
 1615  
 1620  
 1625  
 1630  
 1635  
 1640  
 1645  
 1650  
 1655  
 1660  
 1665  
 1670  
 1675  
 1680  
 1685  
 1690  
 1695  
 1700  
 1705  
 1710  
 1715  
 1720  
 1725  
 1730  
 1735  
 1740  
 1745  
 1750  
 1755  
 1760  
 1765  
 1770  
 1775  
 1780  
 1785  
 1790  
 1795  
 1800  
 1805  
 1810  
 1815  
 1820  
 1825  
 1830  
 1835  
 1840  
 1845  
 1850  
 1855  
 1860  
 1865  
 1870  
 1875  
 1880  
 1885  
 1890  
 1895  
 1900  
 1905  
 1910  
 1915  
 1920  
 1925  
 1930  
 1935  
 1940  
 1945  
 1950  
 1955  
 1960  
 1965  
 1970  
 1975  
 1980  
 1985  
 1990  
 1995  
 2000  
 2005  
 2010  
 2015  
 2020  
 2025  
 2030  
 2035  
 2040  
 2045  
 2050  
 2055  
 2060  
 2065  
 2070  
 2075  
 2080  
 2085  
 2090  
 2095  
 2100  
 2105  
 2110  
 2115  
 2120  
 2125  
 2130  
 2135  
 2140  
 2145  
 2150  
 2155  
 2160  
 2165  
 2170  
 2175  
 2180  
 2185  
 2190  
 2195  
 2200  
 2205  
 2210  
 2215  
 2220  
 2225  
 2230  
 2235  
 2240  
 2245  
 2250  
 2255  
 2260  
 2265  
 2270  
 2275  
 2280  
 2285  
 2290  
 2295  
 2300  
 2305  
 2310  
 2315  
 2320  
 2325  
 2330  
 2335  
 2340  
 2345  
 2350  
 2355  
 2360  
 2365  
 2370  
 2375  
 2380  
 2385  
 2390  
 2395  
 2400  
 2405  
 2410  
 2415  
 2420  
 2425  
 2430  
 2435  
 2440  
 2445  
 2450  
 2455  
 2460  
 2465  
 2470  
 2475  
 2480  
 2485  
 2490  
 2495  
 2500  
 2505  
 2510  
 2515  
 2520  
 2525  
 2530  
 2535  
 2540  
 2545  
 2550  
 2555  
 2560  
 2565  
 2570  
 2575  
 2580  
 2585  
 2590  
 2595  
 2600  
 2605  
 2610  
 2615  
 2620  
 2625  
 2630  
 2635  
 2640  
 2645  
 2650  
 2655  
 2660  
 2665  
 2670  
 2675  
 2680  
 2685  
 2690  
 2695  
 2700  
 2705  
 2710  
 2715  
 2720  
 2725  
 2730  
 2735  
 2740  
 2745  
 2750  
 2755  
 2760  
 2765  
 2770  
 2775  
 2780  
 2785  
 2790  
 2795  
 2800  
 2805  
 2810  
 2815  
 2820  
 2825  
 2830  
 2835  
 2840  
 2845  
 2850  
 2855  
 2860  
 2865  
 2870  
 2875  
 2880  
 2885  
 2890  
 2895  
 2900  
 2905  
 2910  
 2915  
 2920  
 2925  
 2930  
 2935  
 2940  
 2945  
 2950  
 2955  
 2960  
 2965  
 2970  
 2975  
 2980  
 2985  
 2990  
 2995  
 3000  
 3005  
 3010  
 3015  
 3020  
 3025  
 3030  
 3035  
 3040  
 3045  
 3050  
 3055  
 3060  
 3065  
 3070  
 3075  
 3080  
 3085  
 3090  
 3095  
 3100  
 3105  
 3110  
 3115  
 3120  
 3125  
 3130  
 3135  
 3140  
 3145  
 3150  
 3155  
 3160  
 3165  
 3170  
 3175  
 3180  
 3185  
 3190  
 3195  
 3200  
 3205  
 3210  
 3215  
 3220  
 3225  
 3230  
 3235  
 3240  
 3245  
 3250  
 3255  
 3260  
 3265  
 3270  
 3275  
 3280  
 3285  
 3290  
 3295  
 3300  
 3305  
 3310  
 3315  
 3320  
 3325  
 3330  
 3335  
 3340  
 3345  
 3350  
 3355  
 3360  
 3365  
 3370  
 3375  
 3380  
 3385  
 3390  
 3395  
 3400  
 3405  
 3410  
 3415  
 3420  
 3425  
 3430  
 3435  
 3440  
 3445  
 3450  
 3455  
 3460  
 3465  
 3470  
 3475  
 3480  
 3485  
 3490  
 3495  
 3500  
 3505  
 3510  
 3515  
 3520  
 3525  
 3530  
 3535  
 3540  
 3545  
 3550  
 3555  
 3560  
 3565  
 3570  
 3575  
 3580  
 3585  
 3590  
 3595  
 3600  
 3605  
 3610  
 3615  
 3620  
 3625  
 3630  
 3635  
 3640  
 3645  
 3650  
 3655  
 3660  
 3665  
 3670  
 3675  
 3680  
 3685  
 3690  
 3695  
 3700  
 3705  
 3710  
 3715  
 3720  
 3725  
 3730  
 3735  
 3740  
 3745  
 3750  
 3755  
 3760  
 3765  
 3770  
 3775  
 3780  
 3785  
 3790  
 3795  
 3800  
 3805  
 3810  
 3815  
 3820  
 3825  
 3830  
 3835  
 3840  
 3845  
 3850  
 3855  
 3860  
 3865  
 3870  
 3875  
 3880  
 3885  
 3890  
 3895  
 3900  
 3905  
 3910  
 3915  
 3920  
 3925  
 3930  
 3935  
 3940  
 3945  
 3950  
 3955  
 3960  
 3965  
 3970  
 3975  
 3980  
 3985  
 3990  
 3995  
 4000  
 4005  
 4010  
 4015  
 4020  
 4025  
 4030  
 4035  
 4040  
 4045  
 4050  
 4055  
 4060  
 4065  
 4070  
 4075  
 4080  
 4085  
 4090  
 4095  
 4100  
 4105  
 4110  
 4115  
 4120  
 4125  
 4130  
 4135  
 4140  
 4145  
 4150  
 4155  
 4160  
 4165  
 4170  
 4175  
 4180  
 4185  
 4190  
 4195  
 4200  
 4205  
 4210  
 4215  
 4220  
 4225  
 4230  
 4235  
 4240  
 4245  
 4250  
 4255  
 4260  
 4265  
 4270  
 4275  
 4280  
 4285  
 4290  
 4295  
 4300  
 4305  
 4310  
 4315  
 4320  
 4325  
 4330  
 4335  
 4340  
 4345  
 4350  
 4355  
 4360  
 4365  
 4370  
 4375  
 4380  
 4385  
 4390  
 4395  
 4400  
 4405  
 4410  
 4415  
 4420  
 4425  
 4430  
 4435  
 4440  
 4445  
 4450  
 4455  
 4460  
 4465  
 4470  
 4475  
 4480  
 4485  
 4490  
 4495  
 4500  
 4505  
 4510  
 4515  
 4520  
 4525  
 4530  
 4535  
 4540  
 4545  
 4550  
 4555  
 4560  
 4565  
 4570  
 4575  
 4580  
 4585  
 4590  
 4595  
 4600  
 4605  
 4610  
 4615  
 4620  
 4625  
 4630  
 4635  
 4640  
 4645  
 4650  
 4655  
 4660  
 4665  
 4670  
 4675  
 4680  
 4685  
 4690  
 4695  
 4700  
 4705  
 4710  
 4715  
 4720  
 4725  
 4730  
 4735  
 4740  
 4745  
 4750  
 4755  
 4760  
 4765  
 4770  
 4775  
 4780  
 4785  
 4790  
 4795  
 4800  
 4805  
 4810  
 4815  
 4820  
 4825  
 4830  
 4835  
 4840  
 4845  
 4850  
 4855  
 4860  
 4865  
 4870  
 4875  
 4880  
 4885  
 4890  
 4895  
 4900  
 4905  
 4910  
 4915  
 4920  
 4925  
 4930  
 4935  
 4940  
 4945  
 4950  
 4955  
 4960  
 4965  
 4970  
 4975  
 4980  
 4985  
 4990  
 4995  
 5000  
 5005  
 5010  
 5015  
 5020  
 5025  
 5030  
 5035  
 5040  
 5045  
 5050  
 5055  
 5060  
 5065  
 5070  
 5075  
 5080  
 5085  
 5090  
 5095  
 5100  
 5105  
 5110  
 5115  
 5120  
 5125  
 5130  
 5135  
 5140  
 5145  
 5150  
 5155  
 5160  
 5165  
 5170  
 5175  
 5180  
 5185  
 5190  
 5195  
 5200  
 5205  
 5210  
 5215  
 5220  
 5225  
 5230  
 5235  
 5240  
 5245  
 5250  
 5255  
 5260  
 5265  
 5270  
 5275  
 5280  
 5285  
 5290  
 5295  
 5300  
 5305  
 5310  
 5315  
 5320  
 5325  
 5330  
 5335  
 5340  
 5345  
 5350  
 5355  
 5360  
 5365  
 5370  
 5375  
 5380  
 5385  
 5390  
 5395  
 5400  
 5405  
 5410  
 5415  
 5420  
 5425  
 5430  
 5435  
 5440  
 5445  
 5450  
 5455  
 5460  
 5465  
 5470  
 5475  
 5480  
 5485  
 5490  
 5495  
 5500  
 5505  
 5510  
 5515  
 5520  
 5525  
 5530  
 5535  
 5540  
 5545  
 5550  
 5555  
 5560  
 5565  
 5570  
 5575  
 5580  
 5585  
 5590  
 5595  
 5600  
 5605  
 5610  
 5615  
 5620  
 5625  
 5630  
 5635  
 5640  
 5645  
 5650  
 5655  
 5660  
 5665  
 5670  
 5675  
 5680  
 5685  
 5690  
 5695  
 5700  
 5705  
 5710  
 5715  
 5720  
 5725  
 5730  
 5735  
 5740  
 5745  
 5750  
 5755  
 5760  
 5765  
 5770  
 5775  
 5780  
 5785  
 5790  
 5795  
 5800  
 5805  
 5810  
 5815  
 5820  
 5825  
 5830  
 5835  
 5840  
 5845  
 5850  
 5855  
 5860  
 5865  
 5870  
 5875  
 5880  
 5885  
 5890  
 5895  
 5900  
 5905  
 5910  
 5915  
 5920  
 5925  
 5930  
 5935  
 5940  
 5945  
 5950  
 5955  
 5960  
 5965  
 5970  
 5975  
 5980  
 5985  
 5990  
 5995  
 6000  
 6005  
 6010  
 6015  
 6020  
 6025  
 6030  
 6035  
 6040  
 6045  
 6050  
 6055  
 6060  
 6065  
 6070  
 6075  
 6080  
 6085  
 6090  
 6095  
 6100  
 6105  
 6110  
 6115  
 6120  
 6125  
 6130  
 6135  
 6140  
 6145  
 6150  
 6155  
 6160  
 6165  
 6170  
 6175  
 6180  
 6185  
 6190  
 6195  
 6200  
 6205  
 6210  
 6215  
 6220  
 6225  
 6230  
 6235  
 6240  
 6245  
 6250  
 6255  
 6260  
 6265  
 6270  
 6275  
 6280  
 6285  
 6290  
 6295  
 6300  
 6305  
 6310  
 6315  
 6320  
 6325  
 6330  
 6335  
 6340  
 6345  
 6350  
 6355  
 6360  
 6365  
 6370  
 6375  
 6380  
 6385  
 6390  
 6395  
 6400  
 6405  
 6410  
 6415  
 6420  
 6425  
 6430  
 6435  
 6440  
 6445  
 6450  
 6455  
 6460  
 6465  
 6470  
 6475  
 6480  
 6485  
 6490  
 6495  
 6500  
 6505  
 6510  
 6515  
 6520  
 6525  
 6530  
 6535  
 6540  
 6545  
 6550  
 6555  
 6560  
 6565  
 6570  
 6575  
 6580  
 6585  
 6590  
 6595  
 6600  
 6605  
 6610  
 6615  
 6620  
 6625  
 6630  
 6635  
 6640  
 6645  
 6650  
 6655  
 6660  
 6665  
 6670  
 6675  
 6680  
 6685  
 6690  
 6695  
 6700  
 6705  
 6710  
 6715  
 6720  
 6725  
 6730  
 6735  
 6740  
 6745  
 6750  
 6755  
 6760  
 6765  
 6770  
 6775  
 6780  
 6785  
 6790  
 6795  
 6800  
 6805  
 6810  
 6815  
 6820  
 6825  
 6830  
 6835  
 6840  
 6845  
 6850  
 6855  
 6860  
 6865  
 6870  
 6875  
 6880  
 688

ein Cauer-Filter 2. Ordnung als Tiefpassfilter dient.

6. Antriebsregelung nach Anspruch 5,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- 5 die Drehzahlregelung als digitaler Regler mit einem Rechenmittel ausgestaltet ist, der das Cauer-Filter anhand der folgenden Differenzengleichung 2. Ordnung realisiert:

$$u_k = a_0 u_{k-1} + a_1 u_{k-2} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + b_2 e_{k-2}$$

10 mit

$u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und

$e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

7. Antriebsregelung nach Anspruch 4,

- 15 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass ein Cauer-Filter 8. Ordnung als Tiefpassfilter dient.

8. Antriebsregelung nach Anspruch 7,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- 20 die Drehzahlregelung als digitaler Regler mit einem Rechenmittel ausgestaltet ist, der das Cauer-Filter anhand der folgenden Differenzengleichung 8. Ordnung realisiert:

$$u_k = a_0 u_{k-1} + a_1 u_{k-2} + \dots + a_7 u_{k-7} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + \dots + b_8 e_{k-8}$$

25

mit

$u_k$  : Filterausgang im Rechentakt  $k$  und

$e_k$  : Filtereingang im Rechentakt  $k$ .

- 30 9. Verwendung eines PDT2-Filters zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke einer Regelung für einen elektrischen Antrieb.

- 35 10. Verwendung eines PDT2-Filters zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke einer Drehzahlregelung für einen elektrischen Antrieb.

11. Verwendung eines Cauer-Filters zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke einer Regelung für einen elektrischen Antrieb.

5 12. Verwendung eines Cauer-Filters zur Unterdrückung von Resonanzen in der Regelstrecke einer Drehzahlregelung für einen elektrischen Antrieb.

10 13. Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine oder Roboter mit einer Antriebsregelung nach einem der Ansprüche 1 bis 8.

## Zusammenfassung

Phasensparende Tiefpassfilter zur Antriebsregelung bei hoher Regeldynamik

5

In der Erfindung werden die lediglich aus der Nachrichtentechnik bekannten Filter PDT2-Glied (PDT2) und Cauer-Filter (C2) zum Einsatz bei regelungstechnischen Aufgaben der Automatisierungstechnik vorgeschlagen, insbesondere für einen einem Drehzahlregler nachgeschalteten Filter. Diese besitzen für Aufgaben der Regelungstechnik den Vorteil einer größeren Robustheit, da ein großer Frequenzbereich gefiltert wird, und einen wesentlich geringeren Phasenabfall als herkömmliche Tiefpassfilter (PT2). Mit diesen phasensparenden Tiefpassfiltern wird somit im Vergleich zum bekannten Stand der Technik ein Verlust an Dynamik deutlich minimiert und ein Optimum aus Robustheit und Dynamik erreicht.

10

15

FIG 6



FIG 1

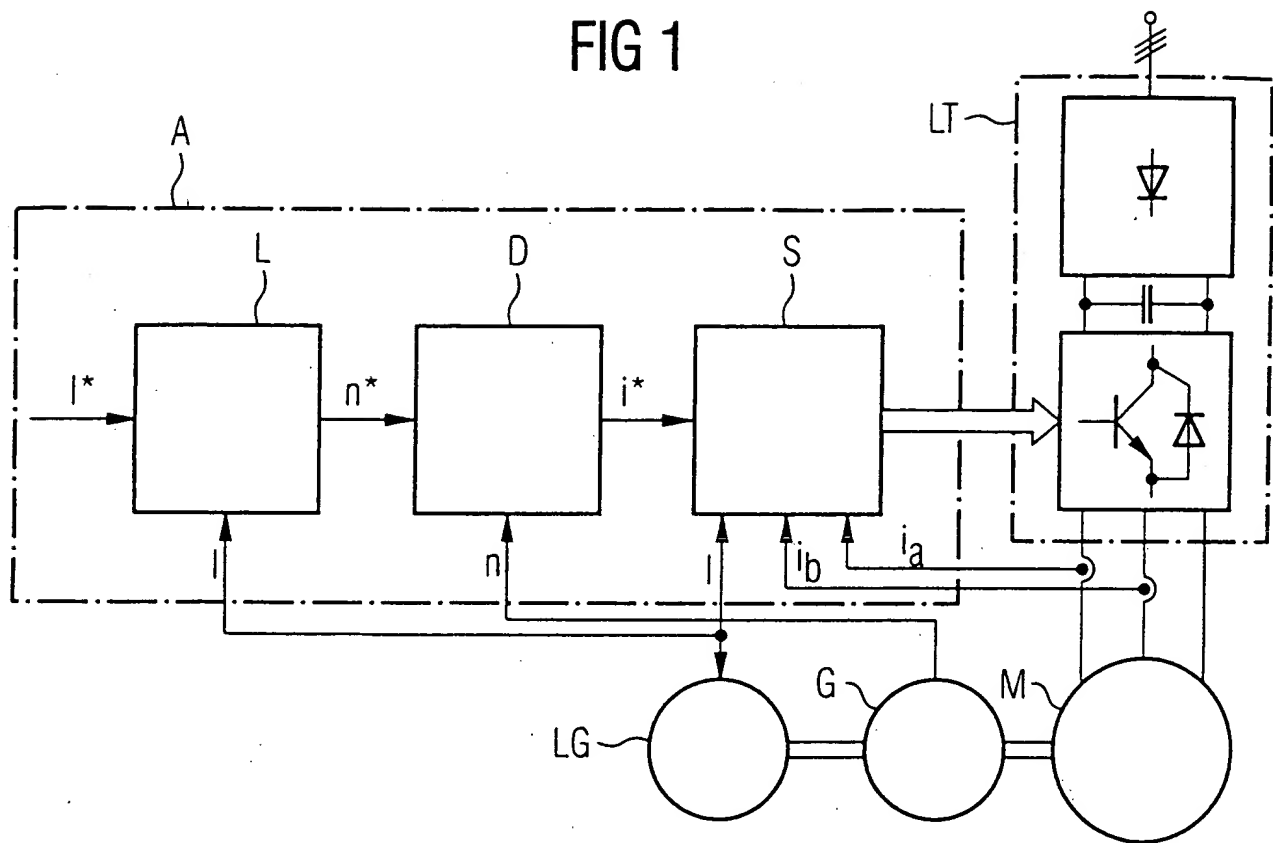


FIG 2

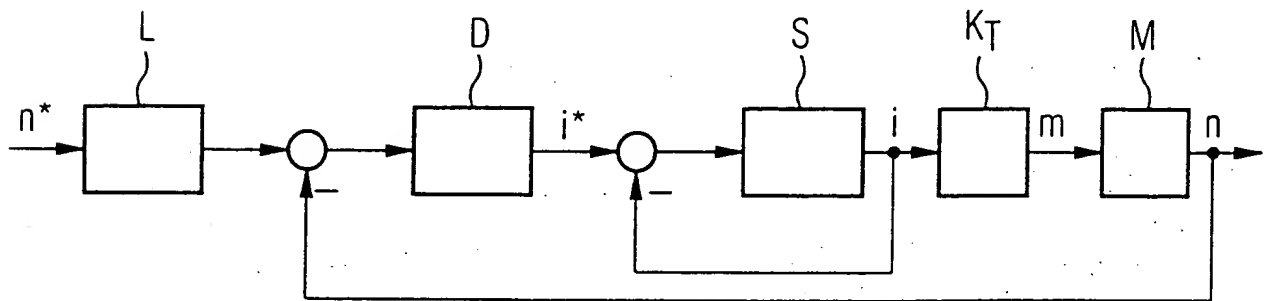


FIG 3

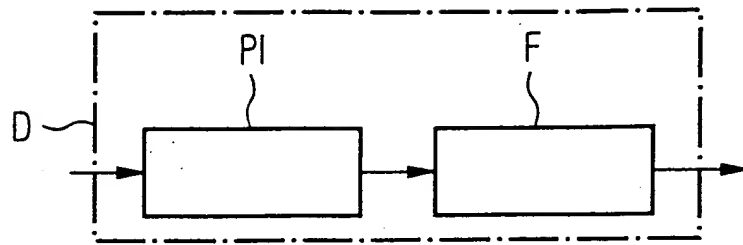


FIG 4

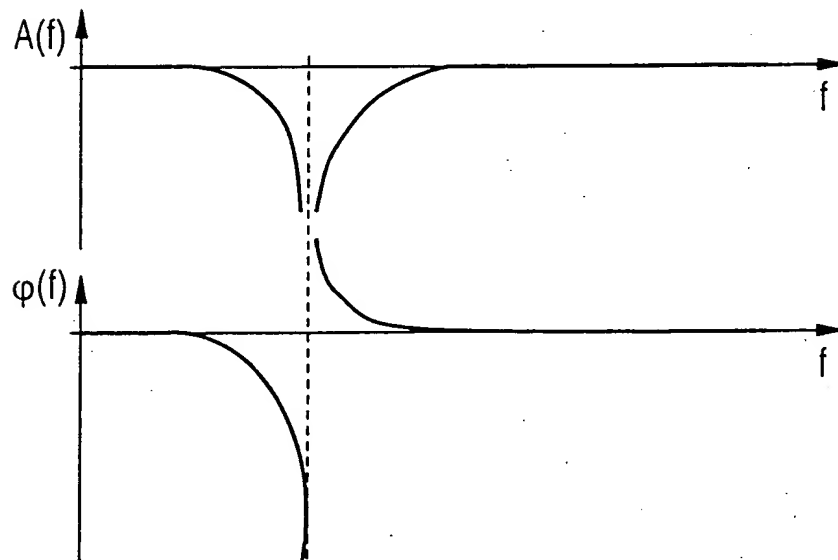


FIG 5

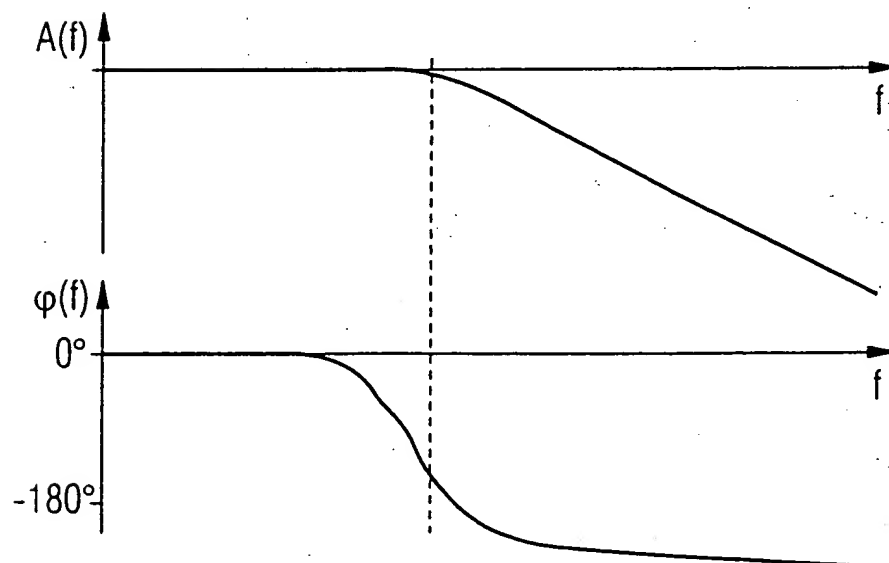


FIG 6

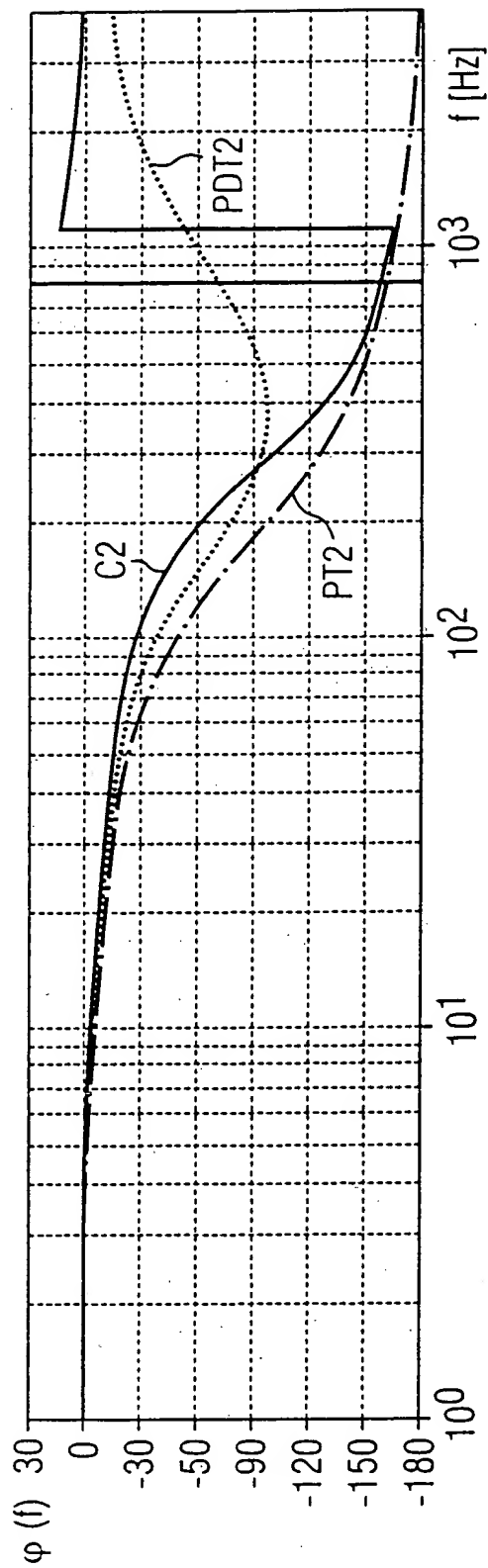
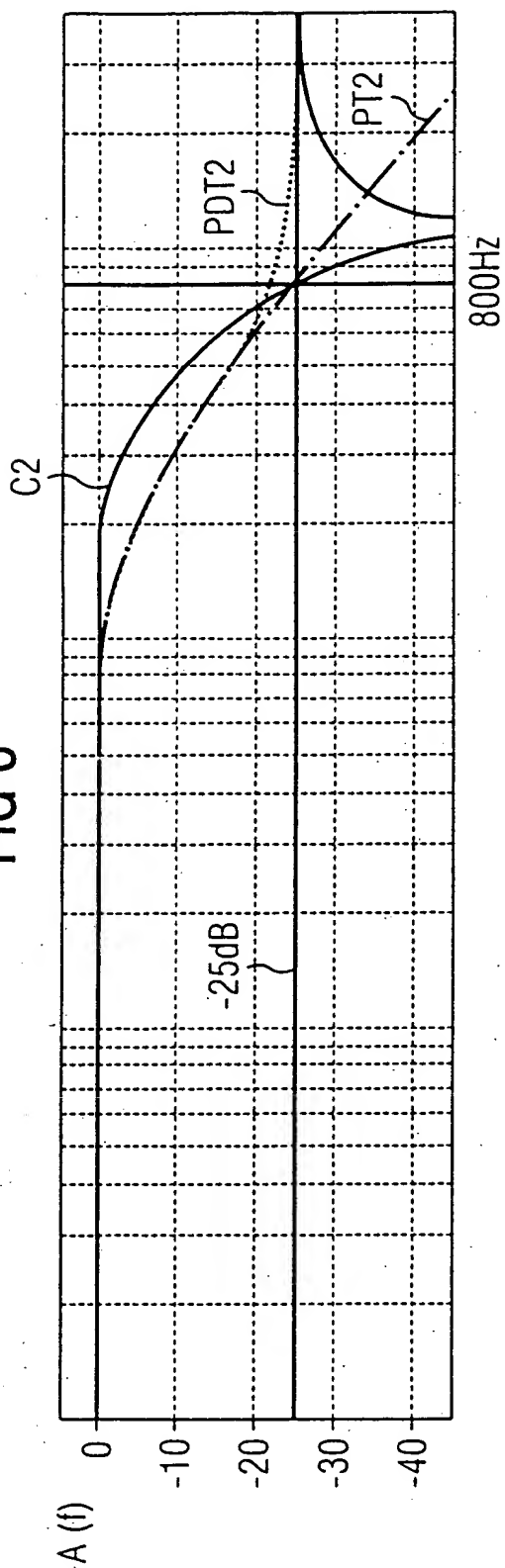
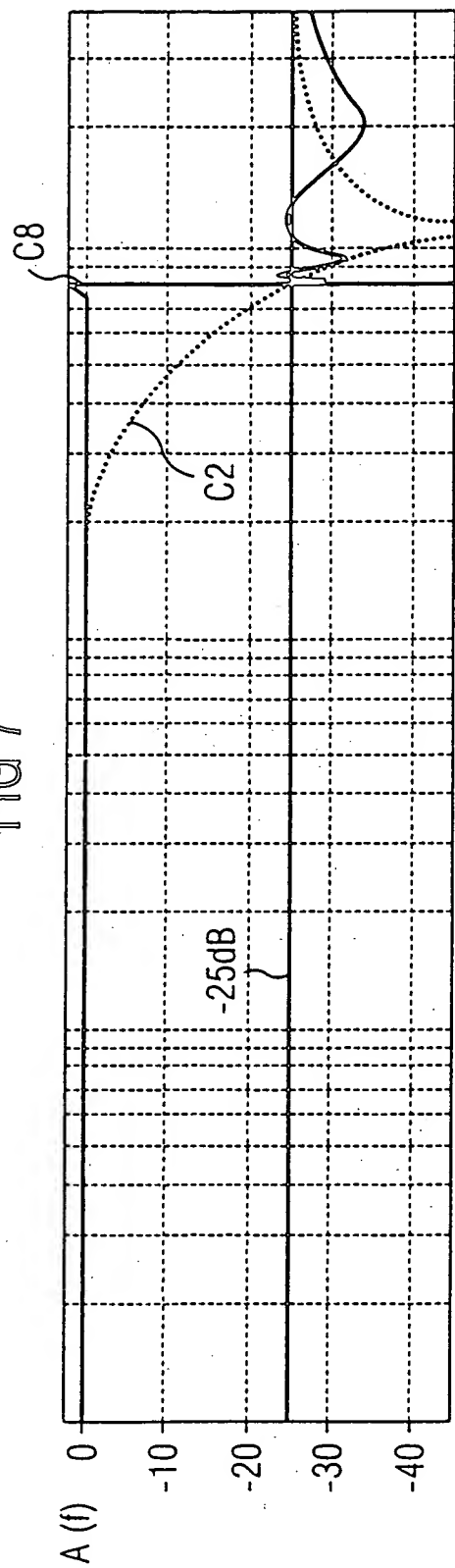


FIG 7



800Hz

